

УДК 620.179.147+519.853.6

В.Я. ГАЛЬЧЕНКО, Р.В. ТРЕМБОВЕЦЬКА, В.В. ТИЧКОВ  
Черкаський державний технологічний університет

### ОПТИМАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ВИХРОСТРУМОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТА АНАЛІЗ МЕТОДІВ РОЗВ'ЯЗКУ НЕЛІНІЙНИХ ОБЕРНЕНИХ ЗАДАЧ

*Реалізація априорі заданих характеристик вихрострумів перетворювачів передбачає використання процедур оптимального синтезу їх конструкцій, зокрема, систем збудження на етапі проектування. Розглянуто формулювання задачі оптимального проектування перетворювача із наперед заданою характеристикою чутливості як некоректно поставленої оберненої нелінійної з математичної точки зору задачі. Проведено огляд та відповідний аналіз математичних методів, що використовуються для розв'язку задач такого класу, а саме, введення шуканого розв'язку до множини коректності, регуляризації із використанням функціоналу Тихонова, методи ітеративної регуляризації, що створені на єдиній схемі поточної апроксимації зворотного оператора, оптимізаційний метод. Окреслені переваги та недоліки цих методів. Розглянуто особливості, які необхідно враховувати при виборі методу оптимізації, такі як, багатоекстремальність задачі; необхідність пошуку глобального екстремуму; складність топології гіперповерхні пошуку; наявність обмежень, введення яких до цільової функції ускладнює топологію поверхні пошуку; суттєву нелінійність та можливу недиференційованість функції цілі; алгоритмічне або складне аналітичне представлення цільової функції. Враховуючи це, обрано оптимізаційний метод розв'язку нелінійної оберненої задачі проектування системи збудження вихрострумів перетворювача з використанням сучасного метаевристичного стохастичного алгоритму пошуку глобального екстремуму. Даний алгоритм заснований на низькорівневій гібридизації методів оптимізації роєм часток та генетичного алгоритму і забезпечує еволюційне формування складу рою. В дослідженнях доведена доцільність застосування сурогатної оптимізації для розв'язку сформульованої задачі з метою зменшення ресурсоемності оптимізаційних алгоритмів при обчисленнях з використанням складних для розрахунків цільових функцій. Вказано ефективні апроксимаційні техніки побудови метамодель, необхідні для практичної реалізації сурогатної оптимізації.*

*Ключові слова: оптимальний синтез; вихрострумів перетворювач; густина вихрових струмів; обернена задача; нелінійна некоректна задача; регуляризаційні методи; сурогатна оптимізація; метамодель; стохастичний метаевристичний алгоритм оптимізації.*

В.Я. ГАЛЬЧЕНКО, Р.В. ТРЕМБОВЕЦКАЯ, В.В. ТЫЧКОВ  
Черкасский государственный технологический университет

### ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И АНАЛИЗ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ

*Реализация априори заданных характеристик вихретоковых преобразователей предусматривает использование процедур оптимального синтеза их конструкций, в частности систем возбуждения, на этапе проектирования. Рассмотрена формулировка задачи оптимального проектирования преобразователя с заранее заданной характеристикой чувствительности как некорректно поставленной*

обратной нелинейной с математической точки зрения задачи. Проведен обзор и соответствующий анализ математических методов, используемых при решении задач такого класса, а именно, введение искомого решения в множество корректности, регуляризации с использованием функционала Тихонова, методы итеративной регуляризации, созданные на единой схеме поточечной аппроксимации обратного оператора, оптимизационный метод. Указаны преимущества и недостатки этих методов. Рассмотрены следующие особенности, которые необходимо учитывать при выборе метода оптимизации: многоэкстремальность задачи; необходимость поиска глобального экстремума; сложность топологии гиперповерхности поиска; наличие ограничений, введение которых в целевую функцию усложняет топологию поверхности поиска; существенную нелинейность и возможную недифференцируемость функции цели; алгоритмическое или сложное аналитическое представление целевой функции. Учитывая это, избран оптимизационный метод решения нелинейной обратной задачи проектирования системы возбуждения вихревого преобразователя с использованием современного метаэвристического стохастического алгоритма поиска глобального экстремума. Данный алгоритм основан на низкоуровневой гибридизации методов оптимизации роем частиц и генетического алгоритма и обеспечивает эволюционное формирование состава роя. В исследовании доказана целесообразность применения суррогатной оптимизации для решения сформулированной задачи с целью уменьшения ресурсоемкости оптимизационных алгоритмов при вычислениях с использованием сложных целевых функций. Указаны эффективные аппроксимационные техники построения метамоделей, необходимые при практической реализации суррогатной оптимизации.

Ключевые слова: оптимальный синтез; вихревой преобразователь; плотность вихревых токов; обратная задача; нелинейная некорректная задача; регуляризационные методы; суррогатная оптимизация; мета модель; стохастический метаэвристический алгоритм оптимизации.

V.Ya. HALCHENKO, R.V. TREMBOVETSKA, V.V. TYCHKOV  
Cherkasy State Technological University

### **OPTIMAL DESIGN OF EDDY CURRENT PROBES AND METHODS OF ANALYSIS SOLUTIONS OF NONLINEAR INVERSE PROBLEMS**

*The implementation of a priori specified characteristics of eddy current probes involves the use of procedures for the optimal synthesis of their structures, in particular, excitation systems at the design stage. The formulation of the optimal design problem of a probe with a predetermined sensitivity characteristic, as an incorrectly posed inverse nonlinear from a mathematical point of view of the problem, is considered. A review and a corresponding analysis of the mathematical methods used to solve problems of this class are carried out, namely, the introduction of the desired solution into the set of correctness regularized using the Tikhonov functional, iterative regularization methods created by the unified scheme of pointwise approximation of the inverse operator, optimization method. The advantages and disadvantages of these methods are indicated. The following features that must be considered when choosing an optimization method are considered: multi-extreme task; the need to search for a global extremum; the complexity of the search hypersurface topology; the presence of restrictions whose introduction into the objective function complicates the topology of the search surface; significant non-linearity and possible non-differentiability of the target function; an algorithmic or complex analytical representation of the objective function. With this in mind, the optimization method for solving the nonlinear*

*inverse problem of designing an eddy current probe excitation system using the modern metaheuristic stochastic global extremum search algorithm was chosen. This algorithm is based on a low-level hybridization of particle swarm optimization methods and the genetic algorithm and provides the evolutionary formation of the swarm composition. The study proved the feasibility of using surrogate optimization to solve the formulated problem in order to reduce the resource consumption of optimization algorithms in calculations using complex objective functions. Effective approximation techniques for constructing metamodels that are necessary for the practical implementation of surrogate optimization are indicated.*

*Keywords: optimal synthesis; eddy current probe; eddy current density; inverse problem; nonlinear ill-posed problems; regularization methods; surrogate optimization; metamodel; stochastic metaheuristic optimization algorithm.*

### Постановка проблеми

В огляді [1] узагальнено та систематизовано накопичений досвід, а також результати теоретичних досліджень, присвячені проблемі проектування вихрострумівих перетворювачів (ВСП) з рівномірною чутливістю в зоні контролю, обумовленою однорідним розподілом густини індукованих струмів, що протікають в об'єкті. Забезпечення цієї умови значно покращує можливості визначення форми дефектів при контролі об'єктів, їх допустимих геометричних розмірів, наявних локальних структурних відхилень матеріалу. Сучасні підходи реалізації апіорі заданих характеристик перетворювачів передбачають використання процедур оптимального синтезу їх конструкцій, зокрема систем збудження (СЗ) [2–3], на етапі проектування.

Зазвичай при проектуванні виконується структурний та параметричний синтез конструкції об'єкта [4–10]. Внаслідок суттєвих проблем з формалізацією структурний синтез реалізувати значно складніше, тому в конструкторській практиці частіше застосовується процедура параметричного синтезу [8, 11]. Зазначимо, що під структурним синтезом будемо розуміти визначення переліку різнотипних в загальному випадку компонентів (секцій котушки), які є складовими об'єкту (СЗ перетворювача) та забезпечують найкраще їх поєднання, а також схему взаємодії між ними (узгоджене або зустрічне включення по полю), виходячи із природи фізичного зв'язку [4–5]. Результату досягають використанням дискретної оптимізації для пошуку прийнятної структури варіюванням невідомих на кінцевій множині. В складних випадках доводиться розв'язувати задачі відносно високої розмірності, які відносяться до категорії

NP–важких. Тому повний перебір варіантів структур і навіть скорочений, здійснений методами випадкового пошуку, є неприйнятними.

Оптимальний параметричний синтез полягає в визначенні найкращих значень параметрів для вибраної на попередньому етапі структури системи збудження перетворювача із врахуванням усіх вимог до неї, зокрема щодо забезпечення заданого розподілу густини вихрових струмів (ГВС) в об'єкті контролю (ОК) [6–7].

Далі обмежимося розглядом задачі параметричного оптимального синтезу СЗ ВСП із наперед заданою характеристикою чутливості.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

З точки зору співвідношення причина-наслідок задачу оптимального синтезу перетворювача з однорідною чутливістю в зоні контролю можна віднести до обернених задач (ОЗ) математичного моделювання [12]. Тобто розв'язок ОЗ дає змогу визначитися з невідомими параметрами СЗ перетворювача, використовуючи в якості вхідних даних апіорі задану її бажану характеристику. В загальному випадку математичне формулювання ОЗ в операторній формі має вигляд:

$$A \cdot z = u, u \in U, z \in Z, \quad (1)$$

де  $z$  – шукане рішення;  
 $u$  – задана права частина;  
 $A$  – оператор зв'язку між  $z$  та  $u$  (лінійний, нелінійний, інтегральний, диференціальний і тощо);  
 $U, Z$  – метричні простори.  
 Причому замість точних  $u$  і  $A$  відомі їх приблизні значення  $u_\delta, A_h$  такі, що:

$$\|u_\delta - u\|_U \leq \delta, \quad \|A_h - A\| \leq h,$$

де  $\delta \geq 0, h \geq 0$  – похибки правої частини і оператора.

Тобто за даних умов необхідно виконати розв'язок операторного рівняння:

$$A_h \cdot z = u_\delta. \quad (2)$$

Слід зазначити, що права частина рівняння (2) асоціюється з наперед заданою характеристикою розподілу ГВС в ОК, а шуканий розв'язок – з параметрами СЗ перетворювача, які реалізують цю характеристику.

Розв'язок ОЗ складає окрему проблему, що обумовлено певними їх математичними особливостями. Внаслідок такої специфічності цей клас задач відноситься до некоректно поставлених [13–14]. Причиною цього є характерна для них практично завжди відсутня неперервна залежність від правої частини рівняння (2), що при незначних збуреннях вхідних даних призводить до нестійких значень розв'язку, тобто його пілкоподібного характеру із значними відмінностями від точного. Розв'язок ОЗ далеко не завжди буває однозначно визначеним, тобто є не єдиним [15–16]. Крім того, ОЗ лише в дуже рідких випадках, які представляють практичну цінність в технічних додатках, є лінійними. Зазвичай шукані параметри входять до операторного рівняння нелінійним чином. Відповідно до цих зауважень проблема розв'язання ОЗ полягає в пошуку умовно коректного за А.М. Тихоновим її розв'язку [17], максимально наближеного до точного, стійкого до змін вхідних даних. Перевагою такого підходу є гарантоване отримання певного розв'язку ОЗ.

### Мета дослідження

Провести аналіз та узагальнити наукові дослідження стосовно існуючих методів розв'язку некоректно поставлених нелінійних обернених задач та відібрати доцільний для реалізації задачі оптимального синтезу СЗ ВСП.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Теорія нелінійних некоректних задач на даному етапі ще знаходиться у розвитку та опрацьована в значно меншій степені ніж лінійних. Універсального методу розв'язку некоректних задач на даний час не існує. Стійкість розв'язку ОЗ залежить від вибору простору розв'язків: задачі можуть бути некоректно поставленими у одному просторі розв'язків та коректно поставленими в іншому. Отримання наближеного стійкого розв'язку ОЗ є можливим із використанням додаткової інформації щодо нього. Один із шляхів такого підходу полягає у *введенні шуканого розв'язку у множину коректності*,

тобто при умові його належності деякому компакт (множині спеціальної структури) [18–19]. Відповідно до ідеї, сформульованої А.М. Тихоновим, якщо є відомим факт того, що множина розв'язків є компактом, тоді задача розв'язку операторного рівняння вважається коректною при умові, коли права частина рівняння належить образу компакту. Ідея є вірною також і для нелінійних операторів. Такий підхід забезпечує стійкість розв'язку ОЗ до варіацій вхідних даних, які не виводять його за межі множини коректності. При такій ситуації апріорні відомості щодо рівня похибки вхідних даних при пошуку розв'язку не потрібні. Особливістю методу є суттєве використання апріорних обмежень, а саме кількісної та якісної інформації щодо структури розв'язку ОЗ. Близькими до групи методів, що реалізують цю ідею, є методи підбору, квазірозв'язку, квазіобернення тощо [12]. До появи сучасних ефективних методів регуляризації методи цієї групи використовувалися в якості основних для пошуку задовільних для дослідників наближених розв'язків некоректних задач. Необхідність попереднього визначення компакту є головним недоліком даного підходу.

До найбільш популярних чисельних методів, які призначені для розв'язання некоректних ОЗ, відносяться *регуляризаційні*. Загалом існує значна кількість підходів до побудови регуляризуючих операторів, але найбільше поширення отримав *варіаційний*. В його основі закладено універсальний спосіб наближеного розв'язання некоректної ОЗ, запропонований А.М. Тихоновим, який полягає в зведенні вихідної задачі виду (2) до іншої, що вимагає пошуку мінімуму певного згладжуючого функціонала. Суть ідеї складає стабілізація мінімуму середньоквадратичного відхилення лівої частини операторного рівняння від правої його частини внаслідок введення до складу функціоналу залежного від параметра регуляризації доданка. Вибір значення параметра регуляризації здійснюється в залежності від рівня збурення вхідних даних задачі та є компромісом між точністю процедури її розв'язку та стійкістю його оцінок, а проблема адекватного вибору параметра регуляризації має визначальне значення для пошуку розв'язку максимально наближеного до точного. Функціонал Тихонова має наступний вигляд [13]:

$$z_{\eta}^{\alpha} = \arg \min_{z \in D} \left( \|A_h z - u_{\delta}\|^2 + \alpha \cdot \|z\|^2 \right), \quad (3)$$

де  $\alpha > 0$  параметр регуляризації;  
 $A$  – лінійний оператор, діючий із гільбертова простору  $Z$  в гільбертовий простір  $U$ ;  
 $D$  – замкнута випукла множина, причому  $z \in D \subseteq Z$ .

Доведено, що модифікована задача (3) має єдиний розв'язок навіть для випадку, коли у вихідній задачі він взагалі відсутній. Метод не потребує знання апріорної інформації про належність розв'язку ОЗ деякій множині коректності.

Незважаючи на те, що ці теоретичні здобутки було отримано для лінійного оператора рівняння (2), А.М. Тихоновим вони були узагальнені на випадок розв'язку нелінійних некоректних ОЗ в рамках варіаційного підходу [20]. Проблемою в цьому є мінімізація функціоналу нев'язки з причини його не випуклості. Але схема є можливою при виконанні умови посиленої неперервності нелінійного оператора, коли він перетворює послідовності, які слабо збігаються у просторі  $Z$ , в послідовності, що сильно збігаються у просторі  $U$ . Або також при використанні схеми компактного вкладення з трьома просторами  $V \rightarrow Z \rightarrow U$ , де простір  $V$  вкладається в простір  $Z$  із допомогою неперервного оператора  $B$ . Тоді функціонал Тихонова приймає вигляд:

$$M^\alpha [v] = \|A_h Bv - u_\delta\|^p + \alpha \cdot \|v\|^2, \quad z = Bv. \quad (4)$$

Також слід зазначити, що для побудови наближеного розв'язку некоректно поставлених ОЗ з нелінійним оператором можливим є використання згладжуючого функціонала Тихонова (3), що підтверджується дослідженнями [21-23] з певною специфікою щодо апостеріорного вибору параметра регуляризації. Недоліком методу вважається фактично емпіричне налаштування регуляризуючого функціонала під кожен конкретну задачу.

В якості альтернативи до регуляризуючого алгоритму Тихонова широке використання отримали методи *ітеративної регуляризації* [21-23], що створені на єдиній схемі поточної апроксимації оберненого оператора. Завдяки ефективності, алгоритмічній простоті побудови та універсальності ітеративні регуляризаційні методи знайшли застосування при розв'язанні не тільки лінійних ОЗ, а й нелінійних задач. На сьогоднішній час обґрунтованими є принципи побудови регуляризуючих алгоритмів на основі виконання деяких ітераційних схем обчислень, в яких номер ітерації, узгоджений з похибками вхідних даних, використовується в якості параметра регуляризації. Формально ці схеми не знайшли суттєвих змін в порівнянні до класичних ітераційних [26–30]. Ідея полягає в тому, що ітераційні методи є робастними до похибок даних, з якими вони працюють, і тому на перших ітераціях наближені результати розв'язку ОЗ незначною мірою відрізняються від аналогічних наближень, що спостерігаються для точних вхідних даних. Похибки наростають поступово при збільшенні числа ітерацій, тому має сенс переривати обчислювальний процес при досягненні стійких наближень з урахуванням рівня похибок вхідних даних. В узагальненому випадку ітераційний процес виконується відповідно до формули при виборі різних  $G_k(z_k^\delta, u_\delta)$ :

$$z_{k+1}^\delta = z_k^\delta + G_k(z_k^\delta, u_\delta). \quad (5)$$

Серед ефективних методів ітераційної регуляризації можна відзначити метод нелінійних ітерацій Ландвебера (Landweber), методи Ньютонівського типу (Levenberg–Marquardt, Gauss–Newton, Broyden's method, iterated Tikhonov regularization). До недоліків ітераційних методів регуляризації можна віднести обмежену область застосування, низьку в деяких випадках збіжність та проблему вибору належного початкового наближення.

Значну кількість прикладних задач, зокрема оптимального проектування ВСП, може бути сформульовано як *екстремальні*, тобто задачі пошуку екстремуму функціонала при заданих певних обмеженнях на аргументи. Серед таких задач зустрічаються і не стійкі, тобто некоректні. Зосередимся на задачах, які потребують знаходження мінімуму функціонала  $J$  на множині  $D$ :  $J^* = \inf \{J(z) : z \in D\}$ . До функціонала досить легко приєднати обмеження з використанням множників Лагранжа. Для стійкого наближеного розв'язку екстремальних некоректних задач необхідним є використання регуляризації. Варіанти варіаційних алгоритмів розв'язку нелінійних операторних рівнянь наведено в [20, 30], де використовуються певні стабілізаційні функціонали. Здебільшого для розв'язання таких задач застосовують градієнтні методи пошуку, які характеризуються досить високою збіжністю.

Досить успішним також є досвід використання для розв'язку екстремальних некоректних задач принципу *саморегуляризації*. При цьому первинне формулювання некоректної ОЗ зберігається, її розв'язок виконується з застосуванням наближених методів, які надають можливість керувати за рахунок «в'язкості» обчислювальних процедур алгоритмів мірою близькості шуканого розв'язку до точного. Відповідні зміни параметрів обчислювальних алгоритмів забезпечують природну фільтрацію високочастотних складових шуканого розв'язку.

В більшості випадків в якості цільової функції задачі оптимізації застосовують суму квадратів нев'язок, але можливими є й інші варіанти. При виборі методу оптимізації необхідно враховувати певні особливості, що є характерними при такому формулюванні задачі нелінійного математичного програмування:

- наявність значної кількості локальних екстремумів, тобто багатоекстремальність задачі;
- необхідність пошуку глобального екстремуму;
- складна топологія гіперповерхні пошуку, яка характеризується багатовимірною «яружністю», наявністю «плато», точок перегину поверхні тощо;
- наявність обмежень, введення яких до цільової функції ще більш ускладнює топологію поверхні пошуку;
- суттєва нелінійність та можлива недиференційованість функції цілі;
- алгоритмічне або складне аналітичне представлення цільової функції, що потребує значних обчислювальних ресурсів та затрат часу для розрахунків, обумовлює використання громіздких чисельних методів та часто становить непросту самостійну задачу.

Всім цим вимогам задовольняють сучасні метаевристичні стохастичні алгоритми оптимізації як еволюційні, так і поведінкові, які засновані на моделюванні колективної поведінки систем, що самоорганізуються та складаються з взаємодіючих агентів [31, 32].

Суттєва ресурсоемність нелінійних оптимізаційних задач зі складними для обчислень цільовими функціями робить затребуваними для використання технології *сурогатної оптимізації* [33], яка передбачає заміну ресурсоемної функції цілі її замісником, що є апроксимованим аналогом, тобто метамоделлю, та потребує значно менших обчислювальних ресурсів і дає можливість пошуку розв'язку за реальний час. Під метамоделлю будемо розуміти просту в обчислювальному сенсі формальну модель на більш складну модель, побудовану на фізичних законах.

Складова функція цілі задачі оптимального синтезу СЗ ВСП являє собою складну аналітичну залежність  $J$ , яка містить невластні кратні інтеграли I-го роду, складні функції форми котушки, що включають в себе спеціальні функції Бесселя I-го роду I-го порядку. Дослідження [34] показали значні витрати часу навіть для однократних обчислень значень цільових функцій. В табл. 1 показано часові витрати на розрахунок аналітичної залежності розподілу ГВС в ОК для СЗ у вигляді витків кругової та прямокутної форм із їх розташуванням паралельно та перпендикулярно до поверхні ОК.

Такі значні часові витрати, отримані для найпростішого випадку СЗ у вигляді одиночного кругового витка або прямокутної рамки, свідчать про неможливість безпосереднього використання аналітичної функціональної залежності [34] в задачах оптимального синтезу.

Застосування сурогатної оптимізації дозволяє усунути проблему необмеженого збільшення обчислювальних ресурсів та розв'язувати задачі оптимального синтезу з використанням метамоделей ВСП. В цьому випадку в оптимізаційному алгоритмі має сенс використовувати модель – замісник  $\hat{J}$ , що описує поверхню відгуку:

$$F_{target} = \sum_{i=1}^N \left( \sum_{k=1}^M \hat{J}_{ik} - J_{reference} \right)^2 \rightarrow \min .$$

Таблиця 1

Витрати часу на розрахунок ГВС для різновидів котушок збудження

Форма котушки збудження	Положення СЗ відносно ОК	Розмір котушки, мм	Час на розрахунок, годин
кругова	нерухома	5	3,5
		25	8
		35	11
	рухома	5	8
		25	15
		35	20
прямокутна	нерухома	20x40	2,5
	рухома		9
прямокутна	нерухома тангенціальна	12x12	2
		12x24	3
	рухома тангенціальна	12x12	7
		12x24	9

При цьому задача створення метамоделі є непростю і зводиться до побудови апроксимаційної функції поверхні відгуку і виконується на попередньому перед оптимальним синтезом етапі. В складних випадках для її реалізації застосовують комбіновані методи апроксимації із поєднанням методів штучного інтелекту та традиційних математичних методів наближення та аналізу даних.

Певні особливості побудови метамоделей продемонстровано авторами в роботах [35, 36], де на прикладах показано їх створення для СЗ планарної та об’ємної структури ВСП.

### Висновки

Таким чином, в статті виконано формулювання задачі оптимального проектування вихрострумового перетворювача з наперед заданою характеристикою чутливості як оберненої некоректної нелінійної з математичної точки зору задачі. Проведено огляд та відповідний аналіз математичних методів, що використовуються для розв’язку задач такого класу.

Внаслідок наявності ефективного алгоритму глобального пошуку екстремуму [31, 37], оснований на низькорівневій гібридизації метаевристичних стохастичних методів оптимізації роєм часток з парадигмою колективного інтелекту та генетичного алгоритму, як представника еволюційного підходу, та певних математичних особливостей обрано оптимізаційний метод розв’язку нелінійної оберненої задачі проектування системи збудження ВСП, що забезпечує однорідну чутливість в зоні контролю об’єкта.

В дослідженнях доведена доцільність застосування сурогатної оптимізації для розв’язання сформульованої задачі з метою зменшення ресурсоемності оптимізаційних алгоритмів при обчисленнях з використанням складних для розрахунків цільових функцій. Вказано ефективні апроксимаційні техніки побудови метамоделей, необхідні для практичної реалізації сурогатної оптимізації.



**Список використаної літератури**

1. Halchenko V. Ya., Trembovetskaya R. V., Tychkov V. V. Surface Eddy Current Probes: Excitation Systems of the Optimal Electromagnetic Field (Review). *Devices and Methods of Measurements*. 2020. № 1 (11). P. 42–52.
2. Gal'chenko V. Ya., Vorob'ev M. A. Structural Synthesis of Attachable Eddy-Current Probes with a Given Distribution of the Probing Field in the Test Zone. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2005. № 1 (41). P. 29–33.
3. Гальченко В. Я., Павлов О. К., Воробйов М. О. Нелінійний синтез магнітних полів збудження вихрострумових перетворювачів дефектоскопів. *Методи і прилади контролю якості*. 2002. № 8. С. 3–5.
4. Норенков И. П. Основы автоматического проектирования. Москва: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. 336 с.
5. Норенков И. П. Автоматизированное проектирование. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 188 с.
6. Ли К. Основы САПР (CAD/CAV/CAE). Санкт-Петербург: Питер, 2006. 580 с.
7. Корячко В. П., Курейгин В. М., Норенков И. П. Теоретические основы САПР. Москва: Энергоатомиздат, 1987. 400 с.
8. Андронов С. А. Методы оптимального проектирования. Санкт-Петербург: СПбГУАП, 2001. 168 с.
9. Аветисян Д. А. Автоматизация проектирования электротехнических систем и устройств. Москва: Высшая школа, 2005. 511 с.
10. Свищева Э. А. Структурный синтез неизоморфных систем с однородными компонентами. Харьков: ХТУРЕ, 1998. 256 с.
11. Черноуцкий И. Г. Оптимальный параметрический синтез. Ленинград: Энергоатомиздат, 1987. 128 с.
12. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. Москва: Наука, 1986. 288 с.
13. Тихонов А. Н., Гончарский А. В., Степанов В. В., Ягола А. Г. Численные методы решения некорректных задач. Москва: Наука. 1990. 230 с.
14. Охріменко М. Г., Фартушний І. Д., Кулик А. Б. Некоректно поставлені задачі та методи їх розв'язування. Київ: НТУУ «КПІ», 2014. 228 с.
15. Кабанихин С. И. Обратные и некорректные задачи. Новосибирск: Сибирское научное издательство, 2008. 457 с.
16. Ягола А. Г., Степанова И. Э., Титаренко В. Н. Обратные задачи и методы их решения. Приложения к геофизике. Москва: БИНОМ. Лаб. знаний, 2014. 216 с.
17. Петров Ю. П., Сизиков В. С. Корректные, некорректные и промежуточные задачи с приложениями. Санкт-Петербург: Политехника, 2003. 261 с.
18. Васин В. В., Агеев А. Л. Некорректные задачи с априорной информацией. Екатеринбург: Наука, 1993. 263 с.
19. Сумин М. И. Некорректные задачи и методы их решения. Нижний Новгород: НГУ, 2009. 288 с.
20. Тихонов А. Н., Леонов А. С., Ягола А. Г. Нелинейные некорректные задачи. М.: Наука, 1995. 312 с.
21. Qi-Nian J., Zong-Yi H. On the Choice of the Regularization Parameter for Ordinary and Iterated Tikhonov Regularization of Nonlinear Ill-Posed Problems. *Inverse Problems*. 1997. № 13. P. 815–827.
22. Танана В. П., Боков А. В. Регуляризация нелинейных операторных уравнений. *Известия Челябинского научного центра*. 2003. № 1 (18). С. 6–8.

23. Liu F., Nashed M. Z. Tikhonov Regularization of Nonlinear Ill-Posed Problems with Closed Operators in Hilbert Scales. *Journal of Inverse and Ill-posed Problems*. 1997. № 4 (5). P. 363–376.
24. Алифанов О. М., Артюхин Е. А., Румянцев С. В. Экстремальные методы решения некорректных задач. Москва: Наука, 1988. 287 с.
25. Бакушинский А. Б., Гончарский А. В. Некорректные задачи. Численные методы и приложения. Москва: МГУ, 1989. 1999 с.
26. Engl H. W., Hanke M., Neubaue A. Regularization of Inverse Problems. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. 319 p.
27. Kaltenbacher B., Neubauer A., Schertzer O. Iterative Regularization Methods for Nonlinear Ill-posed Problems. Berlin, New York: Walter de Gruyter & Co, 2008. 202 p.
28. Kaipio J., Somersalo E. Statistical and Computational Inverse Problems. New York: Springer Verlag. 2004. 340 p.
29. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Численные методы решения обратных задач математической физики. Москва: ЛКИ, 2009. 480 с.
30. Жданов М. С. Теория обратных задач и регуляризации в геофизике. Москва: Научный мир, 2007. 712 с.
31. Гальченко В. Я., Якимов А. Н. Популяционные метаэвристические алгоритмы оптимизации роєм частиц: Учебное пособие. Черкассы: ФЛП Третьяков А.Н., 2015. 160 с.
32. Скобцов Ю. А., Федоров Е. Е. Метаэвристики: монография. Донецк: Ноулидж, 2013. 426 с.
33. Jiang P., Zhou Q., Shao X. Surrogate Model-Based Engineering Design and Optimization. Springer (Springer Tracts in Mechanical Engineering), 2020. 240 p.
34. Trembovetska R. V., Halchenko V. Ya., Tychkov V. V. Studying the Computational Resource Demands of Mathematical Models for Moving Surface Eddy Current Probes for Synthesis Problems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 5/5 (95). P. 39–46.
35. Гальченко В. Я., Трёмбовецька Р. В., Тичков В. В. Нейромережева метамодель циліндричного накладного вихрострумового перетворювача як складова сурогатного оптимального синтезу. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2018. № 3/1 (66). С. 32–38.
36. Trembovetska R. V., Halchenko V. Y., Tychkov V. V. Multiparameter Hybrid Neural Network Metamodel of Eddy Current Probes with Volumetric Structure of Excitation System. *International Scientific Journal «Mathematical Modeling»*. 2019. № 4(3). P. 113–116.
37. Гальченко В. Я., Якимов А. Н., Остапущенко Д. Л. Поиск глобального оптимума функций с использованием гибрида мультиагентной роевой оптимизации с эволюционным формированием состава популяции. *Інформаційні технології*. 2010. № 10. С. 9–16.

#### References

1. Halchenko, V. Ya., Trembovetskaya, R. V., & Tychkov, V. V. (2020). Surface Eddy Current Probes: Excitation Systems of the Optimal Electromagnetic Field (Review). *Devices and Methods of Measurements*. **1** (11). 42–52.
2. Gal'chenko, V. Ya., & Vorob'ev, M. A. (2005). Structural Synthesis of Attachable Eddy-Current Probes with a Given Distribution of the Probing Field in the Test Zone. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. **1** (41). 29–33.

3. Halchenko, V. Ya., Pavlov, O. K., & Vorobyov M. O. (2002). Nonlinear Synthesis of Excitation Magnetic Fields of Eddy Current Converters of Flaw Detectors. *Methods and Devices of Quality Control*. **8**. 3–5.
4. Norenkov, I. P. (2002). *Osnovy avtomaticheskogo proektirovanija*. Moskva: Izd-vo MGTU im. Baumana.
5. Norenkov, I. P. (2000). *Avtomatizirovannoe proektirovanie*. Uchebnik. Serija: Informatika v tehničeskom universitete. Moskva: Izd-vo MGTU im. N.Je. Baumana.
6. Li, K. (2006). *Osnovy SAPR (CAD/CAV/CAE)*. Sankt-Peterburg: Piter.
7. Korjachko, V. P., Kurejgin, V. M., & Norenkov, I. P. (1987). *Teoreticheskie osnovy SAPR*. Moskva: Jenergoatomizdat.
8. Andronov, S. A. (2001). *Metody optimal'nogo proektirovanija*. Sankt-Peterburg: SPbGUAP.
9. Avetisjan, D. A. (2005). *Avtomatizacija proektirovanija jelektrotehničeskikh sistem i ustrojstv*. Moskva: Vysshaja shkola.
10. Svirshheva, Je. A. (1998). *Strukturnyj sintez neizomorfnyh sistem s odnorodnymi komponentami*. Har'kov: HTURE.
11. Chernoruckij, I. G. (1987). *Optimal'nyj parametriceskij sintez*. Leningrad: Jenergoatomizdat.
12. Tihonov, A. N., & Arsenin, V. Ja. (1986). *Metody reshenija nekorrektnyh zadach*. Moskva: Nauka.
13. Tihonov, A. N., Goncharskij, A., Stepanov, B. B., & Jagola, A. G. (1990). *Chislennye metody reshenija nekorrektnyh zadach*. Moskva: Nauka.
14. Ohrimenko, M. G., Fartushnij, I. D., & Kulik, A. B. (2014). *Nekorektno postavleni zadachi ta metodi ih rozv'jazuvannja*. Kii'v: NTUU «KPI».
15. Kabanihin, S. I. (2008). *Obratnye i nekorrektnye zadachi*. Novosibirsk: Sibirskoe nauchnoe izdatel'stvo.
16. Jagola, A. G., Stepanova, I. E., & Titarenko, V. N. (2014). *Obratnye zadachi i metody ih reshenija. Prilozhenija k geofizike*. Moskva: BINOM. Lab. znani'.
17. Petrov, Ju. P., & Sizikov, V. S. (2003). *Korrektnye, nekorrektnye i promezhutochnye zadachi s prilozhenijami*. Sankt-Peterburg: Politehnika.
18. Vasin, V.V., & Ageev, A.L. (1993). *Nekorrektnye zadachi s apriornoj informaciej*. Ekaterinburg: Nauka.
19. Sumin, M. I. (2009). *Nekorrektnye zadachi i metody ih reshenija*. Nizhnij Novgorod: NGU.
20. Tihonov, A. N., Leonov, A. S., & Jagola, A. G. (1995). *Nelinejnye nekorrektnye zadachi*. Moskva: Nauka.
21. Qi-Nian, J., & Zong-Yi, H. (1997). On the Choice of the Regularization Parameter for Ordinary and Iterated Tikhonov Regularization of Nonlinear Ill-Posed Problems. *Inverse Problems*. **13**. 815–827.
22. Tanana, V. P., & Bokov, A. V. (2003). Reguljarizacija nelinejnyh operatornyh uravnenij. *Izvestija Cheljabinskogo nauchnogo centra*. **1** (18). 6-8.
23. Liu, F., & Nashed M. Z. (1997). Tikhonov Regularization of Nonlinear Ill-Posed Problems with Closed Operators in Hilbert Scales. *Journal of Inverse and Ill-posed Problems*. **4** (5). 363-376.
24. Alifanov, O. M., Artjuhin, E. A., & Rumjancev, S. V. (1988). *Jekstremal'nye metody reshenija nekorrektnyh zadach*. Moskva: Nauka.
25. Bakushinskij, A. B., & Goncharskij, A. B. (1989). *Nekorrektnye zadachi. Chislennye metody i prilozhenija*. Moskva: MGU.

26. Engl, H. W., Hanke, M., & Neubaue A. (1996). *Regularization of Inverse Problems*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers
27. Kaltenbacher, B., Neubauer, A., & Schertzer, O. (2008). *Iterative Regularization Methods for Nonlinear Ill-posed Problems*. Berlin, New York: Walter de Gruyter & Co.
28. Kaipio, J., & Somersalo E. (2004). *Statistical and Computational Inverse Problems*. New York: Springer Verlag.
29. Samarskij, A. A., & Vabishhevich, P. N. (2009). *Chislennye metody reshenija obratnyh zadach matematicheskoy fiziki*. Moskva: LKI.
30. Zhdanov, M. S. (2007). *Teorija obratnyh zadach i reguljarizacii v geofizike*. Moskva: Nauchnyj mir.
31. Halchenko, V. Ya., & Jakimov, A. N. (2015). *Populjacionnye metajevristicheskie algoritmy optimizacii roem chastic: Uchebnoe posobie*. Cherkassy: FLP Tretjakov A.N.
32. Skobcov, Ju. A., & Fedorov, E. E. (2013). *Metajevristiki: monografija*. Doneck: Noulidzh.
33. Jiang, P., Zhou, Q., & Shao X. (2020). *Surrogate Model-Based Engineering Design and Optimization*. Springer (Springer Tracts in Mechanical Engineering).
34. Trembovetska, R. V., Halchenko, V. Ya., & Tychkov, V. V. (2018). Studying the computational resource demands of mathematical models for moving surface eddy current probes for synthesis problems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 5/5 (95). 39-46.
35. Halchenko, V. Ya., Trembovetska, R. V., & Tychkov, V. V. (2018). Nejromerezheva metamodel' cilindrichnogo nakladnogo viprostrumovogo peretvorjuvacha jak skladova surogatnogo optimal'nogo sintezu. *Visnik Hersons'kogo nacional'nogo tehničnogo universitetu*. 3/1 (66). 32–38.
36. Trembovetska, R. V., Halchenko, V. Y., & Tychkov, V. V. (2019). Multiparameter hybrid neural network metamodel of eddy current probes with volumetric structure of excitation system. *International Scientific Journal «Mathematical Modeling»*. 4 (3). 113-116.
37. Halchenko, V. Ya., Yakimov, A. N., & Ostapushchenko D. L. (2010). Poisk global'nogo optimuma funkcij s ispol'zovaniem gibrida mul'tiagentnoj roevoy optimizacii s jevoljucionnym formirovanjem sostava populjacii. *Informacionnye tehnologii*. 10. 9–16.

Гальченко Володимир Якович – д.т.н., професор, професор кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету, член Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики, e-mail: halchvl@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0304-372X.

Трембовецька Руслана Володимирівна – к.т.н., доцент, доцент кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету, член Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики, e-mail: r.trembovetska@chdtu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-2308-6690.

Тичков Володимир Володимирович – к.т.н., доцент кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету, член Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики, e-mail: v.tychkov@chdtu.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9997-307X.